

水答案——寻找一杯干净的水

(新加坡) 联合早报网 (2012-05-14)

蓝伟光博士/水之篇之三

(联合早报网专稿) 本系列开篇的“水叹息”提醒大家中国面临水资源短缺、水污染严重、水生态恶化三大问题；第二篇“水隐私”则告诉公众自来水面临水源污染无法避免、传统的水处理工艺不但无法有效去除污染物，反而会产生致癌的加氯消毒副产物、管网与高楼水箱供水引发二次污染三大难题。看过前述两篇科普的读者一定忧心忡忡，很自然地会发问，既然事态如此严重，政府应当采取怎样的补救措施？公众又该怎么应对？这就是作者要直面回答的问题，因此本篇的题目直奔主题“水答案”。

看到上述题目，会有个别读者条件反射地要求政府尽快改善水源、不再污染，恢复到原始的水生态状况。我说这感情好，但生态破坏到今天这种程度，即使不再有新的污染（何况这并不可能），要想使其恢复原状，已经不是我们这代人希望看到的了。事实上，世界最顶级的刊物《Nature》（自然）杂志报道，在全球范围内，有 12 亿人缺少安全饮用水，每天约 3900 个儿童死于饮水不洁而产生的疾病。报道还预言，依据目前的发展趋势，水问题在未来几十年中会变得越来越糟糕。

中国的实际情况是，有无数专家学者、新闻媒体、政协委员等不断提出水安全问题，揭示水污染真相，但遗憾的是，却很少有人能对症下药，正面提出保障水安全的具体措施。因此，本篇就是告诉老百姓怎么才能获得一杯安全的饮用水。

一、水质净化要做到什么？

2008 年 3 月 20 日出版的《Nature》（自然）杂志，罕见的用 10 页的篇幅发表美国耶鲁大学、麻省理工学院等四所顶尖大学的包括美国工程院院士在内的多名科学家联合撰写的一篇题为“Science and technology for water purification in the coming decades”（未来几十年水净化的科学与技术）的著名论文，震惊了全球的科学界。只要从事过科研工作的人都明白，世界顶级的自然杂志用如此大的篇幅发表顶尖科学家的这样一篇文章意味着什么。

文章指出，水中的传染性病原体包括各种寄生虫、原生动物、真菌、细菌、立克次氏体、病毒和朊病毒，当一些传染性病原体被传统的自来水消毒工艺去除或减少，但新的变异病毒与细菌却随之产生，因此饮用水的消毒已经变得越来越有挑战性。传统的四步法常规自来水处理工艺中的加氯消毒方法，不但会产生致癌的消毒副产物，而且游离氯对控制水生病原体，如隐孢子虫和鸟分枝杆菌是无能为力的。文章指出饮用水服务行业应使用新兴的技术替换使用多年的加氯消毒技术。

针对自来水的臭氧消毒，文章也指出其明显的缺陷。尽管臭氧与氯结合的方法，相较于自由氯在控制隐孢子虫卵方面非常有效，水中的病毒能被臭氧有效控制，但臭氧消毒会产生其他的消毒副产物，如致癌因子溴酸盐，且结合氯能够形

成其他不规则的毒副产物，如卤乙腈和碘己酸，相较于传统的三氯乙烷等消毒副产物，它们具有更大毒性和更强的致癌效应。

因此，文章提出，未来水质净化的首要目标是能够廉价和高效地检测和去除水中的有害物质。那么水中到底那些有害物质需要去除呢？除了前面提到的水中的微生物指标，中国的水源目前最大的问题还是要设法去除水中的化学污染物，特别是微污染水中的有机物。大多数有毒有害的污染物不仅难以降解，而且具有生物富集性和致癌、致畸、致突变效应，对公众的健康危害很大。此外，必须设法避免因为消毒产生致癌的消毒副产物。

二、如何保障水安全？

所有来自河流、湖泊和含水土层的水大多数都会返回到环境中。自然杂志的文章称，未来水资源的回收和再利用的首要目标是直接从非传统水源获取水，并使其达到饮用水的质量。膜技术因其小的占地面积、不需要添加化学试剂、灵活的设计以及自动化操作使其成为水质净化的最佳选择。

那么，什么是膜技术呢？讲膜技术之前，我们先得搞清楚膜的概念。膜是在仿生学的基础上发展起来的新兴技术，它是模仿细胞膜的功能人工合成的具有选择性分离特征的复合材料。膜技术则是利用膜的分离特性在溶液中去或获得某些组分的分离过程。

膜技术是绿色、节能的新兴产业技术。它代表着一种新兴的分离技术，自索里拉金在美国制备出全世界第一张有商业潜能的膜至今不过五十年的时间，但膜应用的足迹已印记到人类生产生活活动的各个角落。膜技术与传统的分离、提纯技术比较，具有效率高、能耗低、污染少、自动化、设备简单、结构紧凑、易于维修等优点，因此，在制药、化工、石油、染料、纺织、印染、造纸、电子、食品、饮料、冶金等领域得到越来越广泛的应用。尽管膜技术的应用范围很广，但它最大的市场仍然是在水质净化领域，无论是自来水生产、超纯水制备、海水淡化，还是污水处理、废水资源化，膜技术均能发挥重要的作用。

水质净化时应用的膜技术主要是超滤（Ultrafiltration）、反渗透（Reverse Osmosis）、纳滤（Nanofiltration）三种膜分离过程。超滤可以截留所有的病原菌，大分子的蛋白、热原等杂质，但水中溶解的有机物与重金属等化学污染物均不能被截留。因此，尽管超滤在污水处理中被广泛采用，但在饮用水的制备却有很大的局限性。反渗透只能透过水与溶解性的气体，其他所有的溶质都被截留，因此制备的是纯净水，由于纯净水不含矿物质且呈一定的弱酸性，所以长期饮用对人体的健康不利。综上所述，我把它们简单地总结为就饮用水制备而言，超滤水不安全，反渗透水不健康。

纳滤是纳米技术与过滤技术交叉渗透而创新发明的介于超滤与反渗透之间的一种新兴分离技术，它的分离性能依赖于其活性分离层中的纳米级微孔结构，其分离机理遵循吸附-溶解-扩散-透滤模型。纳滤最显著的特点是它在截留那些能透过超滤的有机物及重金属的同时又能透滤部分被反渗透截留的矿物质，使浓缩与透盐的过程同步进行，从而达到特定的分离纯化要求。通俗的说就是让小分子的溶解矿物质和水透过，其他的物质被截留。

Nanofiltration 这一英文词上世纪八十年代中期才在美国出现，尽管比此更早的时候以色列科学家已经合成了具有选择性透滤一价离子的反渗透膜。我于 1992

年率先把 Nanofiltration 引进中国，并创造了纳滤这一新兴的中文词汇，随后受到中国科学、技术与工业界的广泛认同与普遍采用。二十年来，我所领导的团队一直致力于纳滤技术的发明与创新，世界各地特别是中国的制药、食品、化工、冶金、环保等领域都留下了我们开发与应用纳滤技术的印记，我也因此被人戏称为中国的“纳滤之父”。

国内对应用纳滤处理饮用水的研究虽然起步较晚，但非常活跃。不过研究的方向主要集中在对水中总污染物的处理，如化学需氧量、总有机碳、三氯甲烷前驱物等的去除效率等等。而国外则已经用纳滤处理地表水进行饮用水的生产。

世界上第一个大规模应用纳滤生产饮用水的项目是 1999 年在法国巴黎北郊梅里奥塞建设的日产 14 万吨饮用水的项目，经纳滤处理的饮用水产水品质相当高，已经检测不到有机物的含量，生物可降解的物质远远低于分析仪器的下限。当时巴黎市政当局选择纳滤的原因是水源地奥塞河遭遇了农药、杀虫剂等有机物的微污染，跟当今中国各地水源地遭遇的情形极其相似，在此情形下，纳滤是饮用水净化的最佳选择。世界水资源专家认为，没有微污染、含有矿物质的纳滤水是 21 世纪的最佳饮用水。

三、自来水厂应该怎样升级改造？

自来水处理工艺经过一百多年的发展，目前国外已历经四代工艺：

第一代是传统的混凝、沉淀、过滤、加氯消毒四步法工艺，主要以去除原水中的悬浮物、浊度、色度和病原菌为主，对溶解性有机物去除能力极其有限。这一工艺发明至今已有一百多年的历史了，它对早年处理以病原菌为主要对象的水质净化厂而言是适用的，一旦水源被污染，则会导致处理效果欠佳。

第二代是以臭氧、活性炭为核心的深度氧化技术，起源于上世纪七十年代，它是在第一代去除效果的基础上，解决了有毒微量有机物及加氯消毒副产物的危害问题。但它的缺点是吸附了有机物的活性炭为病原菌、藻类等生长提供了富含营养物的温床，藻类死亡后分解的具有致癌效应的藻毒素可能残留水中，因此饮用水的安全性仍然受到质疑。

第三代是以超滤膜为核心的组合工艺，它是在上世纪九十年代开始应用，在第一代工艺去除效果的基础上，能有效减少氯代前驱物，且出水的浊度始终保持在极低的水平，对细菌、两虫（隐孢子虫和贾第鞭毛虫）、藻类等水生生物的去除率可达到 100%，但它的致命缺点是对有机物的去除几乎没有帮助，因此针对目前中国各自来水水源有机物含量超标是主要矛盾的现状，这一工艺仍存在极大的局限性。

第四代是以纳滤技术为核心的新兴工艺。纳滤是纳米技术与过滤技术交叉渗透而创新发明的介于超滤与反渗透之间的新兴技术。它最显著的特点就是在截留那些能透过超滤的有机物及重金属的同时又能透滤被反渗透截留的部分矿物质。因此纳滤能耗比反渗透低，截留效果比超滤好，被誉为 21 世纪最有前途的水质净化技术。

然而，现在中国的情况是，一方面，国内 97% 的自来水采用第一代的四步法工艺，另一方面，中国的江河湖泊，几乎所有的水源地有机物污染不断加重，四步法工艺不但难以去除有机污染物，反而在处理过程中因混凝剂的作用可能增加

氯化消毒的前驱物，从而加氯消毒后会增加致癌的加氯消毒副产物。上述二方面因素的交互作用，是导致目前中国自来水质无法达标的根本原因。

综上所述，针对目前中国水源微污染的现状以及大量水厂仍然采用传统的第一代四步法工艺的现实，笔者建议中国借鉴国外成功的经验与应用实践，直接把自来水的处理工艺升级到第四代的纳滤技术。

很多自来水厂不愿意改造，除了怕麻烦，另外一个理由是害怕改造成本太高，会造成水价猛涨。其实，我们测算过，在国家不补贴的情况下，将现有自来水处理工艺从第一代直接升级到第四代，每吨成本最高才增加 0.7 元，一个三口之家，按每月用水 20 吨计算，即使财政不予任何补贴，每月增加 15 元的成本，在当前的物价条件下，相信大家都可以接受。

从我们作为技术公司的角度看，各种不能改造自来水厂的理由都不能成立。因为作为公共事业的一部分，自来水改造可动用财政等公共资金支持，真正体现出税收“取之于民、用之于民”的特征；所以，现有自来水直接升级换代到第四代的纳滤技术是完全可行的。而且工期很短，改造方便，难度没有想象那么大。

下表是一个简略的测算。

城镇人口	供水量	改造成本	改造工期	每吨水增加费用	每户增加费用(按每月 20 吨水计算)
10 万人	2 万吨/日	1000 万元	6-8 个月	0.7 元	14 元
50 万人	10 万吨/日	4500 万元	6-8 个月	0.6 元	12 元
100 万人	30 万吨/日	1.2 亿元	6-8 个月	0.5 元	10 元

我想反复表达的是，自来水直接升级换代到第四代的纳滤工艺，只要当地政府愿意做，技术与工程完全没有问题，投资也完全没有问题。

在此，我们提供一个日处理 5 万吨自来水的第四代纳滤技术的改造范本，让大家了解自来水改造的可行性与现实性。当然，更精细要求更高的膜改造方法还很多，不一一列举：

1.自来水厂原工艺流程为：回转式隔板反应斜管沉淀池+双阀滤池+液氯消毒+清水池+二级泵房。到目前形成的主要设施为：三座絮凝沉淀池、一座双阀滤池、两座清水池、一座综合加药间、一座二级泵房。制水能力达到 5.0 万 m³/d 规模。

2.改造方案：保留前处理流程，拆除清水池，在此块地板上新建清水池，清水池上设置压力式膜车间，采用纳滤组件后的总工艺如下：回转式隔板反应斜管沉淀池+双阀滤池+（纳滤系统）+液氯消毒+清水池+二级泵房。

3.出水水质：采用纳滤技术处理沉淀池或滤池出水，其最大的特点是对水中微粒、胶体、细菌、病毒、臭味、色度、DBPs 前体物及其他有机物质能彻底去除，还可以有效的保留矿物质，受进水波动的影响小，出厂水质将高于最新颁布的城市供水行业水质标准，达到去除微污染，保留矿物质的目的。

考虑到国内的自来水净化工艺老化，检测手段落后，已经无法剔除水体中的有害微污染，我在此呼吁国家通过政府补贴、BOT 等方式，逐步而渐进地在自来水厂推广纳滤技术，改造水网，解决城镇的饮水安全问题。

四、为什么需要安装家用净水器？

对于普通市民而言,在现阶段水源污染未能改善、自来水消毒方法没有升级、管网污染问题不能解决的情况下,唯一能够自我保护的措施就是一安装家用净水机。从技术的成熟度和稳定性上讲,无论是水体中的化学有机物污染,还是重金属污染,以及细菌、病毒等,均可通过小型的家用净水设备完全过滤掉,其核心技术就是膜技术。膜技术在家庭净水上的费用并不高,一般两三千元就可购置一套,解决一家 3-5 口人的饮用水需求,后期的滤芯更换花费也并不高,平均下来每天仅需 1 元钱左右,普通家庭均可承担。

市面上的家庭净水机,一般采用微滤、超滤、反渗透、纳滤等多种技术,品牌繁多、杂乱,市民在选择购买的时候眼花缭乱,难以取舍。他们之间有什么区别呢?

微滤(一般是 PP 棉):可去除浊度等感观状物理污染物,也就是看得见的污染物。微滤在净水机中,一般用于预处理,如 PP 棉,能直接阻挡泥沙、铁锈等。PP 棉一般 3 个月一换,最初是纯白色的,换的时候看上去最恐怖,往往呈黄色或深褐色。有些商家就会用这个脏的滤芯恐吓消费者,说水污染多严重,他家的净水机过滤效果多好。其实,PP 棉过滤虽然恐怖,但只能证明水脏。水很脏跟水有毒是两回事,家庭终端净水机,不但要去脏,更要去毒。所以,如果有商家的净水机只有 PP 棉这个环节,那肯定是不合格的。

超滤净水器(主要表现为管道机):目前市面上销售的净水(非纯水)器多为微滤或超滤产品,它们在改善水的感观或去除致病菌方面是有效的,可去除细菌、病毒等微生物污染物,价格便宜,水通量大,无需用电、不浪费水,缺点是只能去除物理与微生物污染,对引发疾病的化学污染物束手无策。超滤无法截留化学污染物而导致滤水中仍含有致癌的加氯消毒副产物、环境激素、农药、重金属等微污染,因此超滤水作为生活用水勉强可以接受,作为饮水却有硬伤。

超滤哪怕最小孔径的其截留分子量都不可能小过 1000,而有机污染物的分子量通常都小于 1000,所以要用超滤膜来截留有机污染物是不可能的,需要提醒的是,市场上超滤净水机所用的中空纤维膜其截留分子量都是几十万,绝对不能截留有机污染物。30 年的工农业污染,主要矛盾是 150-1000 分子量之间的激素、抗生素、农药污染严重;常规的砂滤、加氯、超滤、臭氧均无法解决。

反渗透纯水机(RO 净水机,又叫纯水机):反渗透净水机可以剔除水中的所有杂质,缺点是必须接通电源才能工作,而且浪费水,净化 1 杯水,大体需要 2 杯水直接从下水道排走,很浪费。反渗透虽然去除了各种化学污染物,但犹如泼盆中脏水时连小孩也一起泼掉一样,它把水中天然存在且人体需要的矿物质也去除了,净化后的水呈微酸性,对人体健康不利。

纳滤水机(去除微污染,保留矿物质):那么有没可能找到一个既可以拥有超滤与反渗透的优点又能克服两者缺点的净水技术呢?应用纳滤技术可以克服这一难题。

在饮用水净化处理中,根据原水水质及净水要求的不同,有多种不同性能的纳滤膜可供选择。多数的商品纳滤膜虽然在截留有机物与重金属方面性能卓越,但在透滤二价的钙、镁矿物质方面却有缺陷,通常仅能透过一价离子,而人体需要的一些矿物质如二价的钙、镁等元素则会与重金属一起被截留,而且商品纳滤膜与反渗透一样需耗电、浪费水,因此其应用受到一定的限制。

针对上述问题，我们开发出分离性能独特的 NF-CORE 纳滤芯，它在截留有机物与重金属的同时，可透滤人体所需的二价的钙、镁矿物质，从而弥补了商品纳滤膜的缺陷。更值得介绍的是，这一新型的 NF-CORE 纳滤芯水通量大，对有机物与重金属的截留率高，人体所需的二价的钙、镁矿物质透滤性好。

纳滤技术还是一个节能技术，无论是终端净水方式，还是自来水厂的整体解决方案都是非常适用的。自来水厂哪天能用上纳滤技术，我不太乐观，但终端用上纳滤水机确实可以保证居民的饮水安全。针对家庭不同的需求情况，还可以做组合安装，比如，一般用水安装超滤机，饮用水安装纳滤机。

另外，目前的家庭净水机品牌繁多、杂乱，其关键的一点，就是净水机行业尚未有一个国家标准，净水行业还没得到有效的规范。建议中国国家相关部门尽快行动起来，推动制定净水方面的国家标准，对净水市场进行规范，有意识地培育几个技术过硬、服务规范、有实力的大品牌。

（作者是新加坡国立大学教授、中国膜工业协会副理事长、新加坡三达国际集团董事局主席）